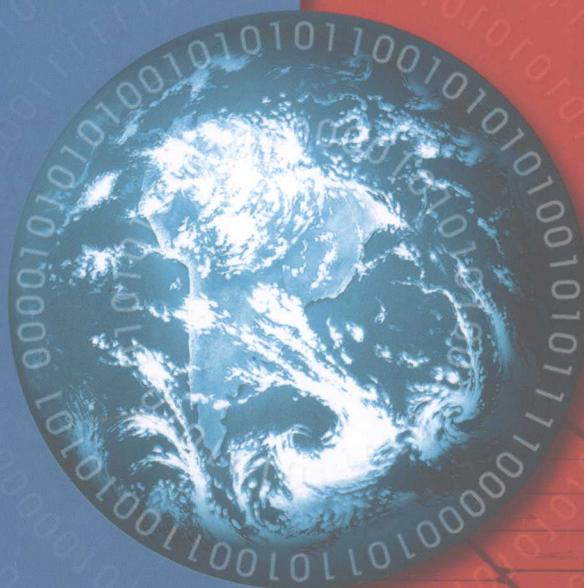


辐射发射控制设计技术

〔美〕 Michel Mardiguian 著
陈爱新 译



科学出版社

www.sciencep.com

TN03/35

2008

辐射发射控制 设计技术

〔美〕 Michel Mardiguian 著

陈爱新 译



1. 辐射... II. ①M... ②陈... III. 电磁兼容设计 IV. TN03

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第013483号

责任编辑：陈文君 封面设计：陈文君

北京万方数据股份有限公司 制作

<http://www.wanfang.com.cn>

科学出版社

科学出版社

(北京·黄岗路·邮编100071)

图字: 01-2006-7390 号

内 容 简 介

本书是一部关于电磁兼容(辐射发射控制)设计的经典著作。全书共分13章,主要内容包括:辐射干扰概论、简单电路的电场和磁场、非正弦波源的辐射声、设计低辐射产品的基本策略、芯片和集成电路级辐射发射控制、印制电路板设计、母板和背板的发射控制、控制开关电源的辐射场、通过内部布线和封装减小辐射电磁干扰、机箱屏蔽、控制外部线缆的辐射、主要辐射发射规范和测试方法、辐射电磁干扰问题排查。

本书的重点不在基础论上,而是侧重于实际应用。近200幅图表以及大量的工程实例便于读者更加形象地理解本书所讲述的知识,并针对在工程设计中所遇到的问题给出了正确有效的解决方案。

本书可供从事电磁兼容设计的科研人员、工程技术人员、教师和研究生参考,也可作为相关专业研究生的教材。

图书在版编目(CIP)数据

辐射发射控制设计技术/(美)Michel Mardiguian 著,陈爱新译. —北京:科学出版社,2008

ISBN 978-7-03-021004-3

I. 辐… II. ①M…②陈… III. 电磁兼容性-设计 IV. TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 013483 号

责任编辑:赵方青 杨 凯 / 责任制作:魏 谨

责任印制:赵德静 / 封面设计:李 力

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

双青印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2008年3月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2008年3月第一次印刷 印张:17 1/4

印数:1—4 000 字数:328 000

定 价:39.50 元

(如有印装质量问题,我社负责调换(环伟))

序

大约在 1991 年,我有幸阅读了一部专著:J. Fluke 所著的《传导发射控制设计技术》。我对该书的评价是:Fluke 先生撰写了一部非常好且实用的著作,但其唯一缺点是它只关注了 EMI 发射问题的一半。当然,这同时也是它的长处。尽管辐射和传导发射不会存在于各自独立的世界,但该书作为一个起点,把它们作为不同的研究现象来考虑时,体现出了《传导发射控制设计技术》一书的实用性。

在与出版商讨论后,为了弥补省略的辐射发射部分,决定请另一位作者完成该书的姊妹篇,书名定为《辐射发射控制设计技术》。我非常高兴能为促成此事尽一点绵薄之力。

与我共事的很多 EMC 工程师都有能力写出一本优秀的有关辐射发射的专著,但极少有人能像 Michel Mardiguian 这样,将实际经验与娴熟的写作技巧有机地结合在一起。在工程上,他曾负责各种不同工程的 EMC 工作,包括武器制导系统、汽车电子、喷气发动机试验平台。最近还有穿越英吉利海峡——连接英国和法国的著名的海底隧道。在学术成就方面,作者已撰写或与人合著 6 本早期著作,包括一部高度实用、评价很高的静电放电专著。他曾走遍美国和欧洲,教授电磁兼容性原理的课程,且 IEEE 会议报告收录了他多篇文章。

Michel 的著作具有以下几个代表性的特点:

①它们的目标瞄准了实际应用,但同时会提供足够的理论材料来支持所建议的设计和改进方案。

②它们紧紧依靠形象化的材料,让读者去“了解”EMI 问题及其解决方案。

③它们省去了所有对于主题研究不是本质内容的东西。

很多作者都感觉无法抗拒这样的欲望:想把他们知道的所有事情都写到一本书中。但 Michel 避免了该问题,在编写本书的过程中突出重点。

在本书中,作者延续了其一贯的写作风格,但可能做了更大的精炼。数学材料主要限定在两章内,以使本书看上去大部分是实际应用。超过 175 幅的图表以很容易理解的形式提供信息。这种类型的书很难编辑,而且出版成本较高,但读者从中受益匪浅。一些主题(如 EMC 测试)一带而过,但读者可以从本书中获得参考的其他有关的信息源。

称本书为一部 EMC 经典著作可能有点过早和过于自信,但它的确显示出了一些能够产生长久影响的特征,《辐射发射控制设计技术》紧扣一个清晰的主题进

行研究,并有可能是作者迄今为止最好的作品。



Jeffrey K. Eckert

Jeffrey K. Eckert 公司

弗吉尼亚州盖恩斯维尔市

本书是作者对《电磁兼容》(EMC) 的一部专著, 旨在为从事 EMC 工作的工程师和设计师提供实用的指导。本书的出版恰逢 EMC 技术飞速发展的时期, 许多新的标准和规范不断出台, 给从事 EMC 工作的工程师和设计师带来了极大的挑战。本书的出版旨在为从事 EMC 工作的工程师和设计师提供实用的指导, 帮助他们解决在实际工作中遇到的问题。本书的出版也恰逢 EMC 技术飞速发展的时期, 许多新的标准和规范不断出台, 给从事 EMC 工作的工程师和设计师带来了极大的挑战。本书的出版旨在为从事 EMC 工作的工程师和设计师提供实用的指导, 帮助他们解决在实际工作中遇到的问题。

本书的出版旨在为从事 EMC 工作的工程师和设计师提供实用的指导, 帮助他们解决在实际工作中遇到的问题。本书的出版也恰逢 EMC 技术飞速发展的时期, 许多新的标准和规范不断出台, 给从事 EMC 工作的工程师和设计师带来了极大的挑战。本书的出版旨在为从事 EMC 工作的工程师和设计师提供实用的指导, 帮助他们解决在实际工作中遇到的问题。

本书的出版旨在为从事 EMC 工作的工程师和设计师提供实用的指导, 帮助他们解决在实际工作中遇到的问题。本书的出版也恰逢 EMC 技术飞速发展的时期, 许多新的标准和规范不断出台, 给从事 EMC 工作的工程师和设计师带来了极大的挑战。本书的出版旨在为从事 EMC 工作的工程师和设计师提供实用的指导, 帮助他们解决在实际工作中遇到的问题。

本书的出版旨在为从事 EMC 工作的工程师和设计师提供实用的指导, 帮助他们解决在实际工作中遇到的问题。本书的出版也恰逢 EMC 技术飞速发展的时期, 许多新的标准和规范不断出台, 给从事 EMC 工作的工程师和设计师带来了极大的挑战。本书的出版旨在为从事 EMC 工作的工程师和设计师提供实用的指导, 帮助他们解决在实际工作中遇到的问题。

本书的出版旨在为从事 EMC 工作的工程师和设计师提供实用的指导, 帮助他们解决在实际工作中遇到的问题。本书的出版也恰逢 EMC 技术飞速发展的时期, 许多新的标准和规范不断出台, 给从事 EMC 工作的工程师和设计师带来了极大的挑战。本书的出版旨在为从事 EMC 工作的工程师和设计师提供实用的指导, 帮助他们解决在实际工作中遇到的问题。

本书的出版旨在为从事 EMC 工作的工程师和设计师提供实用的指导, 帮助他们解决在实际工作中遇到的问题。本书的出版也恰逢 EMC 技术飞速发展的时期, 许多新的标准和规范不断出台, 给从事 EMC 工作的工程师和设计师带来了极大的挑战。本书的出版旨在为从事 EMC 工作的工程师和设计师提供实用的指导, 帮助他们解决在实际工作中遇到的问题。

前 言

1999年,在第一版发行7年并取得6次重印的好成绩后,作者认为其部分内容开始显得有些过时。有趣的是,我们在第一版中预言的即将出现的EMI问题现在大部分都已成为现实。应Kluwer学术出版社的邀请,我着手准备这次全新的改版工作。在新版中,将2000年的重大技术进展也考虑了进去。在20世纪末,我们亲眼目睹的巨大突破以及所取得的成就虽然在电子工程发展史上几乎是空前的,但同时也对EMC规则形成了严峻的挑战,这本新版著作将有希望帮助我们赢得胜利。

数字传输的速度及范围,除了采用光纤这类载体,已接近一对铜导线所能承受的极限,这带来了日益增加的辐射污染问题。在大多数功能强大的处理器芯片的核心部分,时钟频率已经超过吉赫[兹],导致印制电路和模块自身达到、甚至有时超过了线缆的射频辐射。

同时,无数受欢迎的射频装置和服务如便携式移动电话、集成了无线调制解调器的笔记本电脑,人人可用的无线互联网等,都流行开来。以至于在市区一平方公里范围内,同时工作的灵敏的射频接收机数以万计。

如此众多的射频源聚集起来,变成了未经许可的发射机,又与如此众多的合法的接收机混杂在一起,更增大了超出以往的可能发生干扰场所的数目。还有,长期暴露在低功率射频发射机,特别是VHF频段上部和UHF频段内的发射机的非常近的近场范围内,对健康可能会造成危害。这有可能促使开展对较低辐射的持续研究。本书旨在给设计工程师、技术人员和EMC专家提供更全面、有效和经济的射频发射抑制方法。

我要特别感谢主编Alex Greene,由于他的及时支持和持续关注,促成了本书的完成。还要感谢DLS电子系统公司的Don Sweeney和Maxine Martin,以及瑞典EMC服务公司的Ulf Nilsson,他们对本书第二版提出了很多建设性的建议。我的感谢还要送给Fabienne Baudron,是他严谨的工作态度才使得本书最终顺利编辑出版。最后,万分感谢Corinne,作为一个要撰写一本专著的工程师的妻子,承受着各种压力,用爱心和耐心支持我完成此书。

Michel Mardiguian
St. Remy les Chevreuse, France

目 录

第 1 章 辐射干扰概论	1
1.1 辐射 EMI 问题	1
1.2 辐射 EMI 的基本知识	2
1.3 EMI 术语和单位	3
1.4 美国和世界其他国家应对辐射 EMI 的措施和标准	4
1.4.1 世界民用标准	5
1.4.2 FCC 发射标准	7
1.4.3 相互认可协议(MRA; Mutual Recognition Agreement)	8
1.4.4 其他美国政府标准(非军方)	8
1.4.5 军方发射标准	8
1.5 系统内和系统间 EMI	10
第 2 章 简单电路的电场和磁场	11
2.1 环路的辐射场	11
2.2 直导线的辐射场	15
2.3 推广至实际真实电路	17
2.4 简单电路的差模辐射	22
2.5 外部线缆的共模辐射	24
2.5.1 怎样估计线缆上的 CM 电流	26
2.5.2 辐射几何结构的正确近似	29
2.5.3 长线辐射	37
第 3 章 非正弦波源的辐射场	39
3.1 周期脉冲的频谱和辐射	39
3.2 宽带源的频谱和辐射	45
3.3 随机与周期频谱	48
3.4 某些频谱的特殊性	49
3.4.1 窄带随机信号	50
3.4.2 重复符号增强电磁干扰(EMI)辐射	52
3.4.3 展布频谱时钟(SSC)减小 EMI	52
3.4.4 占空比不为 0.5 时的偶次与奇次谐波	53
第 4 章 设计低辐射产品的基本策略	57
4.1 影响 EMI 控制的基本系统决策	57

4.2	辐射发射减缩的设计控制区域	59
4.3	辐射 EMI 控制的设计关键点	60
4.4	常驻软件对辐射 EMI 的影响	64
第 5 章	芯片和集成电路级辐射发射控制	65
5.1	逻辑系列	65
5.2	理想旁路电容的计算	70
5.3	IC 地弹反射共模的产生	73
5.4	减小 IC 自身产生的 EMI	74
5.4.1	微处理器的 EMI 控制	74
5.4.2	时钟振荡器的 EMI 影响	75
5.4.3	IC 发射测量的标准方法	75
5.5	IC 封装的影响	77
5.6	IC 级屏蔽	78
5.7	芯片和 IC 级辐射控制小结	79
第 6 章	印制电路板设计	82
6.1	电路板分区	82
6.2	导体的自感	83
6.3	单层板	86
6.3.1	电源分布去耦	86
6.3.2	平行旁路电容的问题	91
6.3.3	卡式电源输入去耦	92
6.3.4	V_{CC} 和地的布线(单层板)	93
6.3.5	地平面和地面积需求(单层板)	93
6.3.6	走线到外壳的寄生去耦	97
6.3.7	时钟线	97
6.4	多层板	98
6.4.1	多层堆叠	98
6.4.2	多层板需要的去耦电容	100
6.4.3	穿孔平面:瑞士奶酪综合征	100
6.4.4	适当的槽缝	103
6.4.5	高速走线的布置	103
6.4.6	模拟数字混合	104
6.4.7	薄箔 PCB	105
6.5	串 扰	106
6.5.1	容性串扰	106

6.5.2 磁性串扰	111
6.6 阻抗匹配	112
6.7 卡式连接器的管脚分配	114
6.7.1 串 扰	115
6.7.2 特性阻抗和失配	117
6.7.3 连接阻抗	117
6.8 0V 参考接地至外壳	119
6.9 用于 PCB 设计的 EMC 软件工具	119
6.10 PCB 级辐射控制小结	120
第 7 章 母板和背板的发射控制	122
7.1 绕线背板	123
7.2 带有 V_{CC} 和地平面的单层或多层母板	124
7.3 串扰和阻抗匹配	124
7.3.1 串 扰	124
7.3.2 阻抗匹配	125
7.4 背板接口处的连接器区域	125
7.5 连接器区域增加的辐射	126
第 8 章 控制开关电源的辐射场	128
8.1 基本辐射源	128
8.2 实际电流波形影响	130
8.3 封装与电路布局	132
8.3.1 变压器和扼流圈的磁泄漏	133
8.3.2 供电 PC 板	136
8.3.3 次级环路	136
8.3.4 机电封装	136
8.4 屏蔽电源模块	138
8.5 电源滤波器对辐射 EMI 的影响	139
第 9 章 通过内部布线和封装减小辐射 EMI	144
9.1 卡-卡及背板互连	144
9.2 内部同轴和屏蔽线缆	146
9.3 某些隐蔽的辐射天线	149
9.4 参考地和相应的环路的内部连接	152
9.5 I/O 连接器区域	154
9.6 其他的辐射 EMI 源	166

第 10 章 机箱屏蔽	167
10.1 如何确定机箱衰减要求	167
10.2 材料的屏蔽效能	169
10.3 导电塑料的屏蔽效能	173
10.4 场衰减槽形孔缝	175
10.5 改变理想的“墙洞”模型	180
10.5.1 源接近孔缝对泄漏的影响	180
10.5.2 机箱的固有谐振效应	181
10.6 减少泄漏和孔缝处理的方法	183
10.6.1 接合面板和盖的接缝	183
10.6.2 冷却孔缝的屏蔽	186
10.6.3 部件孔洞的屏蔽	192
10.6.4 线缆入口、连接器及非导电穿孔的屏蔽	192
10.6.5 线缆穿孔附近的机箱泄漏的不利影响	196
10.7 特殊屏蔽处理的设备机壳	196
10.8 应用实例:给定 SE 目标值的机箱设计	199
10.9 用于大批量生产的消费产品的屏蔽组件	201
10.10 机箱屏蔽辐射控制小结	201
第 11 章 控制外部线缆的辐射	203
11.1 平衡接口的优点	203
11.2 线路平衡器件	205
11.2.1 信号隔离变压器	205
11.2.2 纵向非隔离变压器	206
11.3 通过加装铁氧体减小 CM 辐射	208
11.4 采用绞合减小 DM 辐射	212
11.5 通过屏蔽减小线缆辐射	214
11.5.1 同轴电缆的辐射场	216
11.5.2 屏蔽对或多芯屏蔽线缆的辐射场	220
11.5.3 屏蔽扁平电缆	221
11.5.4 屏蔽连接的重要性	222
11.5.5 由 SE 目标设定 Z_1	225
11.6 关于屏蔽与非屏蔽双绞线的讨论	227
11.7 采用光纤消除电缆辐射	228
第 12 章 主要辐射发射规范和测试方法	229
12.1 MIL-STD 461-C,D 和 462	229

12.2	CISPR 国际限制标准、测试仪器和方法	232
12.3	FCC 第 15 部分的子部分 B	233
12.4	欧洲标准(EN)55022	233
12.5	德国 VDE 871	233
12.6	EN 55014/CISPR 14	235
12.7	日本非官方干扰控制委员会(VCCI)	236
12.8	FCC 第 18 部分	236
12.9	CISPR 25:汽车电子	237
12.10	RTCA/DO-160	237
第 13 章	辐射 EMI 问题排故	239
13.1	符合规范的线缆辐射与机箱辐射	239
13.2	产品不能通过辐射发射测试时的策略:确定 dB 减缩量	239
13.3	I/O 线缆 CM 电流(VHF 频段)的辐射 RFI 电平的近似	246
附录 A	修正的偶极子模型	251
附录 B	一些支持简化辐射模型的验证结果	253
附录 C	PCB 走线的电感和电容	255
附录 D	几个由 SPICE、MicroCap 或类似仿真工具建立的元件模型的等效电路	258
参考文献		259

第1章 辐射干扰概论

1.1 辐射 EMI 问题

在 20 世纪前半叶,电磁干扰(EMI;electromagnetic interference)一直是进行有线通信和无线通信时所需注意的首要问题。在某些特殊工程师团体中,经验丰富的工程师们归纳总结出了一套系统的分析方法以预测干扰的级别,这些方法考虑了包括源参数、传播媒质以及相应电话或无线电接收机灵敏度等诸多因素。1960 年以前,典型 EMI 源主要是自然大气噪声、电机整流器、荧光灯、汽车点火系统和 50/60Hz 高架线(无意干扰源),再加上其他获批(或未获批)无线电发射机的干扰。

这些干扰所引起的后果可能仅仅是让人们比较烦闷,如电话和收音机信号不好,电视接收信号混乱。但如果受干扰的是关键的发射装置,比如急救设备和飞机导航系统,可能会导致非常严重的后果。

但是,随着合理的频率分配和在国内、国际上采取相当简单的强制措施,电磁干扰问题处于控制之中。“管理电波”是一项较为容易处理的工作。

在 20 世纪后半叶,新的射频源以令人难以置信的速度激增,包括所有计算和数字操作设备(如今已很难找到不采用至少 8 位微处理器的简单家用电器用具)、医疗电子、电源开关、机床、远程控制系统、局域网(LANS:local networks)等。这些设备多数产生离散频率信号链,能够稳定持续地威胁着无线电通信。

与此同时,无线电频谱合法使用者在数量和设备种类上不断增加。在 1950 年以前收音机、电视、导航和安全服务等有限的可确定数量的基础上,射频频谱的使用者仍在不断增长,包括卫星数据传送、遥感和射电望远镜、民用和移动电话、交通定位系统等。

随着潜在的冲突的数量和种类的增加,潜在的受扰设备的数量和种类也在增加,而且增长的速度近似于指数曲线。相应地,干扰的风险以天文数字增长,因此毫不奇怪,规范和规则变得越来越精确和严格,力图把问题控制在可以处理的程度上。

同样严重的是系统自身干扰问题,当多个源和受扰设备紧密包装在一起时,如果忽视或忽略他们之间的 EMI 就会造成系统自身干扰问题。

因此,控制干扰,更明确地说控制辐射干扰(这也是本书的重点),不仅要求设备本身良好运行,而且还要求设备满足军用和民用非干扰标准。EMI 控制必须在产品设计阶段同步进行,而不要延后到质量检测甚至最终可行性测试阶段。否则后期总是要

延误,并且要付出高昂的代价来修理和改进产品。

本书将介绍必要的背景知识和产品的逐步设计过程,设计出的产品既不辐射超出标准的非期望信号,又不会产生自身干扰或与临近的其他设备相互干扰。这种理想条件称为电磁兼容性(EMC;electromagnetic compatibility)。

1.2 辐射 EMI 的基本知识

干扰的发生需要三个要素:

① 源,或者发射机。

② 受扰者,或者接收机。

③ 连接两者的耦合通道。

耦合媒质可以通过传导,或者通过辐射。当然,这种二分法的原因很简单:没有完全脱离辐射的传导,反之亦然。但是,就某个具体的耦合而言,可以是以传导为主,而其他大多数通过空间传播耦合。在本书中,我们重点讨论辐射耦合。

根据内部阻抗,电路在邻近处主要产生电场(伏[特]/米)或者磁场(安[培]/米)。在距离源较远处(大于 $\lambda/2\pi$),则无论源阻抗高低,场都称为电磁场。

就射频干扰而言,1V/m的场是相当强的场,相比较普通收音机或电视接收机的场灵敏度可以低至 $1\mu\text{V}/\text{m}$ 。因此,可以推断电路工作在高频段,即使载有低电平信号,也会在相当远的区域产生干扰。

通过一个简单计算可以得到对这个问题的直觉。假定一台小型计算机主要由CPU和主板组成。计算机电路包括60块芯片,每块芯片消耗大约250mW的功率。再假定只有1/4的芯片与系统内部时钟频率保持同步,假设为50MHz。一次转换过程中总功率消耗是一常数:

$$(1/4) \times (60 \times 0.0250) = 3.75(\text{W})$$

如果有极小部分功率并没有被芯片、配线以及各种电阻或显示器的焦耳效应所消耗,而是被辐射出去。比如(这是非常理想的)假设在50MHz的基频上,只有总转换功率的 10^{-6} 被辐射,也就是 $3.75\mu\text{W}$ 。

对于任意给定的辐射器,由一简单公式给出其场强:

$$E(\text{V}/\text{m}) = \frac{1}{D} \sqrt{30 P_r} \quad (1.1)$$

其中, D 为距离源的距离,m; P_r 为辐射功率(包括天线增益),W。

在3米远的地方,从PC板辐射出的 $3.75\mu\text{W}$ 将产生的 E 为:

$$E = \frac{1 \times \sqrt{30 \times 3.75 \times 10^{-6}}}{3} = 3.5 \times 10^{-3} \text{V}/\text{m} = 3.5 \text{mV}/\text{m}$$

将场强用EMI规范的标准单位表示,为:

$$E(\text{dB}\mu\text{V}/\text{m}) = 20 \log(3.5 \times 10^3 \mu\text{V}/\text{m}) = 71 \text{dB}\mu\text{V}/\text{m}$$

在边远地区,电视机和 FM 收音机要想获得不错的接收效果,需要的最低场强范围是 $50 \sim 60 \text{ dB}\mu\text{V/m}$ 。因此,如果频率相同(同频道 EMI),电脑时钟会严重影响到附近收音机和电视机的接收。因为即使在 3 米远的地方(假定计算机的机箱是塑料的,没有进行任何屏蔽),EMI 场的强度仍然达到声音或图像载波信号的 $3 \sim 10$ 倍。照此情景,这些令人烦恼的干扰可能达到 30 米远,如果在计算机和受扰接收天线之间较短的无线电通道上,存在使场强增强的因素如金属结构、孔洞等,干扰距离可能更远。

毋庸置疑,任何理想设计的基础是:

- ① 理解设计电路存储和处理数据,或者转换功率,结束发送电波的机制。
- ② 为了减弱和消除不利影响,要对上述机制进行数值评估。
- ③ 尽早在样机上测试这些结果。

前两条实际上是设计问题。既然没有电压和电流就不可能有辐射存在,因此大部分的工作就放在了电路设计、波形分析和布线设计上。

1.3 EMI 术语和单位

由于数值变化范围较大,在 EMI/RF/EMC 学科中广泛采用了对数刻度。因此大多数是比值(无量纲),且大小用分贝(dB)来表示。两个功率的比值可以表示为:

$$\text{dB} = 10 \log \frac{P_2}{P_1} \quad (1.2)$$

通常测量数据是以幅度单位表示(如电压、电流、场强),而不是功率。将 $P = V^2/R$ 代入到公式(1.2)中:

$$\begin{aligned} \text{dB} &= 10 \log \frac{(V_2)^2/R_2}{(V_1)^2/R_1} \\ &= 20 \log(V_2/V_1) + 10 \log(R_1/R_2) \end{aligned}$$

如果 $R_1 = R_2$,则简化为:

$$\text{dB} = 20 \log(V_2/V_1) = 20 \log(I_2/I_1) \quad (1.3)$$

表 1.1 列出了公式(1.2)、公式(1.3)常用比值的计算结果。相应负 dB 值可以通过互换比值来得到。

将 1V 或者 1A 代入公式(1.3)中,可以得到用 dB 表示的电压或电流:

$$\text{dBV} = 20 \log V$$

$$\text{dBA} = 20 \log I$$

从 dB 值中重新得到电压、电流或场强的方法是取反对数($\log^{-1}$):

$$V_{\text{volt}} = \log^{-1}(\text{dBV}/20) = 10^{\frac{\text{dBV}}{20}}$$

如果要从用 dBm(高于 1mW 的 dB 值)表示的功率中得出电压,使用下式:

$$\begin{aligned} V_{\text{dB}\mu\text{V}} &= 90 + 10 \log(Z) + P_{\text{dBm}} \\ &= 107 + \text{dBm} \quad (Z = 50\Omega) \end{aligned} \quad (1.4)$$

对于窄带(NB:narrowband)EMI,只有一条谱线(即正弦波)位于接收机(或受扰者)的带宽中,此时电磁干扰信号可以表示为:

- ① 电压:V,高于1V的dB值(dBV)或高于1 μ V的dB值(dB μ V)。
- ② 电流:A,高于1A的dB值(dBA)或高于1 μ A的dB值(dB μ A)。
- ③ 功率:W,mW或高于1mW的dB值(dBm)。
- ④ 电场:V/m, μ V/m或dB μ V/m。
- ⑤ 磁场或磁感应强度:A/m, μ A/m或dB μ A/m。
- ⑥ 辐射功率密度:W/m²,mW/cm²或dBm/cm²。

对于宽带(BB:broadband)EMI,很多条谱线都混叠在接收机的带宽中,对于这种情况,接收到的EMI要归一化到单位带宽中:

- ① 电压: μ V/kHz, μ V/MHz或dB μ V/MHz。
- ② 电流: μ A/kHz, μ A/MHz或dB μ A/MHz。
- ③ 电场: μ V/m/kHz, μ V/m/MHz或dB μ V/m/MHz。
- ④ 磁场: μ A/m/kHz, μ A/m/MHz或dB μ A/m/MHz。

有很多区分NB干扰或BB干扰的方法,其中一个简单的方法是:给出接收机的通带或者3dB带宽(BW:bandwidth)(或者受扰者的输入放大倍数)和EMI源的基准频率F₀,干扰类型判定如下:

BB,若BW>F₀

NB,若BW<F₀

表 1.1 比值与 dB 值转换关系

电压、电流或场幅度比	功率比	分 贝
×1.12	×1.25	+1
×1.25	×1.6	+2
×1.4	×2	+3
×2	×4	+6
×3.16	×10	+10
×5	×25	+14
×10	×100	+20
×1.000	×10 ⁶	+60

例如:1 μ V=0dB μ V;1mV/m=60dB μ V/m;50 Ω =34dB Ω ;1mW=0dBm;
1mW,in50 Ω =0.22V=107dB μ V。

1.4 美国和世界其他国家应对辐射 EMI 的措施和标准

以前最大发射级别是由民间机构和军队组织共同制定的,民用用于保障广播,而军用用于保证重要无线电通信、导航系统信号等的良好接收。其中 TEMPEST 问题

是特殊的一类问题,也就是机密数据可能被非授权接收机窃听的问题(顺便提一下,TEMPEST 只是用于机密程序的代码字,而不是首字母的缩写词。因此,这些字母不“代表”任何事情)。这不仅是军方/政府所关心的国家安全问题,而且也是商业/工业敏感和机密数据的保护问题。

民用有关辐射发射的限制已经相当严格,但是,可以注意到,在飞机、潜艇等中,当源和受扰者距离非常近时(有时不到 1 米的距离),通常来讲军用规范要更加严格。既然本书只是一个设计工具,而非有关规范的百科全书,我们将只简单回顾一下有关辐射 EMI 基本的民标和军标。

1.4.1 世界民用标准

表 1.2 列出了美国和其他一些国家的主要发射标准和法律规定。正如我们所看到的,很多国家的法律规定都是基于 CISPR 文件。

表 1.2 世界主要民用发射标准和规则

工业国家和地区,包括未列入的,通常遵循 CISPR,推荐用于射频发射

	计算机和 数字处理 设备	ISM ¹⁾	电气 用品	收音 机,电 视接 收机	荧 光 管 和 氛管	固态可 变速度 驱动器	发动机点 火装置	车载汽 车电子	移动电 话系统 (话机, 基站)	未经许 可射频 发射机 遥控寻 呼机, 玩具
CISPR ¹⁾ 或国际	22	11	14	13	15	IEC 1800-3	12	25	ETS 300-342	
欧洲际 ²⁾ 标准,EN	55022	55011	55014	55013	55015		55012	EC Dir. 95/54		
美国 ³⁾	FCC15-B	FCC-18		FC15-B			SAE J551. C		FCC22	FCC15-C
加拿大	(ICES. 003)	(ICES. 001)					(ICES. 002)			
日本	VCCI									
澳大利亚, 新西兰	AS3548	AS2064	AS1044	AS1053	AS4051		AS2557			
中国大陆 和台湾	CNS 13438	CNS 13306		CNS 13439						

1) CISPR 表示“国际无线电干扰委员会”。

2) 为了在执行时法律基准一致,每个欧洲国家都已经按指令要求把欧洲标准转换成了国家规则。国家规则常常与 EN 或 CISPR 有所区别,但也是相互参照的。

3) 尽管在某些频段上不是完全吻合,FCC 限制与 CISPR22 或 11 接近。

4) 工业,科学或医疗设备。对于医疗设备,IEC601/2 的 EMC 要求引用了 CISPR11。

一般来说,最大发射电平是由国际委员会制定的。由一个特定设备发出干扰,同时保护无线电通信不受其干扰,在这种设备对设备干扰研究的基础上制定了最大发射电平。很多时候,像美国、德国或荷兰这些国家在某些限制分类上是发起者和主要制

定者。但是,为了避免在国家之间出现各种不同的规定,仍然需要一个名为 CISPR 的国际委员会发布各国一致接受的限制标准,并建立 EMI 发射的测试方案。CISPR 是国际电工技术委员会 IEC 的组成部分。

一旦 CISPR 的限制方案经由 IEC 成员国表决生效,这些方案或早或晚都会转变为各国的国家标准。根据各国政府形式的具体情况,这些限制可以成为或多或少自由采用的工业标准,也可能成为强制性的法律规定。比如德国已经很多年,美国在 1980 年以后,以及欧共体所有成员国最近的形式都属于后一种情况。CISPR 的推荐文本已经发布为欧洲标准(EN)。

欧共体对于 EMC 采取了相当严格的规定。89/336 法案规定:任何设备,无论是在欧洲生产的还是进口的,如果不符合低辐射和免检标准,都无法进行商业买卖。政府给了工业部门一个六年的宽限期来调整和消化处理货仓中的存货。在 1996 年 1 月 1 日之后强制执行,在设备上粘贴 CE 标签来证明产品合格。

对于未通过测试,未达到认证标准(即使实际上没有产生干扰)的产品的处理是非常严格的,制造商(而非用户)可能因此遭到控告和处罚。

不同国家的规定可能略有出入。但是,只要产品设计符合 CISPR 或 EN 发射电平标准,那么可能也会符合大多数工业化国家更细化的干扰法律规定。每个国家都有相应的特殊政策来确保制造商或销售商的产品符合发射限制。一些要求通过国家实验室(如德国的 VDE)的测试和认证,而另一些认可制造商的自我认证。

一般来说,标准主要考虑两种类别的潜在的干扰信号:

① 由有意高频源(主要涵盖 CISPR11、13 和 22)发出的射频信号。这包括高频工业设备、烤箱、焊接、振荡器、数字计算设备以及任何有意产生高频信号但未获批准的发射机设备。通常,这些设备发出的频谱包含了一系列离散、稳定的谱线(窄带频谱)。

② 由无意高频源(主要涵盖 CISPR12、14 和 15)发出的射频信号。这包括电动机、荧光灯、调光器、汽车点火系统以及其他可能偶尔产生射频能量的设备。这些设备的频谱通常是密集的、一系列的随机或者相关的频率(宽带频谱)。

伴随技术的不断进步,大量细化的国际 EMC 标准不断涌现。这些标准日新月异,要将它们在像这样一本书中全部列举出来不仅是乏味的,而且由于是过时数据,常常是无用的。除了著名的计算机类别以外,在庞大数量的设备中,几乎没有一个能够引起足够的注意:

(1) CISPR25 车载接收机射频干扰保护标准

汽车(轿车、卡车、巴士)本身内部就能产生 EMI 的噩梦。大量的噪声元件如脉冲驱动电动机、包含快速时钟的电子控制模块等,不但排列拥挤,而且还与车里的无线电接收机共用电缆系统。这些接收机包括:车载收音机,移动电话,民用和急救接收机,导航/定位系统。在一米范围内,这些接收机天线是典型的潜在骚扰源。这就要求非常严格的发射控制,事实上,CISPR25 辐射限制标准是目前最为严格的标准之一,有